

УПРАВЛЯЕМОЕ ДВИЖЕНИЕ МЕТАЛЛА В ИНДУКЦИОННОЙ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОГО ЧУГУНА

1. ВВЕДЕНИЕ

Производство синтетического чугуна включает в себя плавку стальных отходов и науглероживание получившегося расплава с помощью углеродосодержащих материалов. Использование для этих целей индукционной тигельной печи связано не только с возможностью точно контролировать температурный режим, но и с наличием естественного двухконтурного движения металла, облегчающего процесс науглероживания. Однако слабая связь между верхним и нижним контурами движения расплава в ИТП увеличивает время усвоения углерода расплавом, что приводит к высоким затратам электроэнергии на подогрев металла, а также усложняет процесс контроля качества [1, 2].

Использование дополнительного донного индуктора, получающего питание от трехфазной сети промышленной частоты и создающего разбегающееся от центра электромагнитное поле, позволяет увеличить интенсивность перемешивания металла в тигле без существенного его перегрева.

В данной статье предложены различные решения по использованию и модернизации дополнительного донного индуктора-перемешивателя, с целью увеличения скорости движения металла в объеме для повышения скорости усвоения углерода.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Поскольку оценка всех электромагнитных гидродинамических процессов в печи производилась средствами компьютерного моделирования в программе COMSOL Multiphysics, то была построена двумерная осесимметричная модель печи с соотношением высоты тигля к его диаметру 0,54, представленная на рисунке 1. Выбор такого отношения геометрических размеров тигля связан с габаритами донного индуктора, который не получится разместить под тиглем со стандартным отношением 1,1 – 1,3.

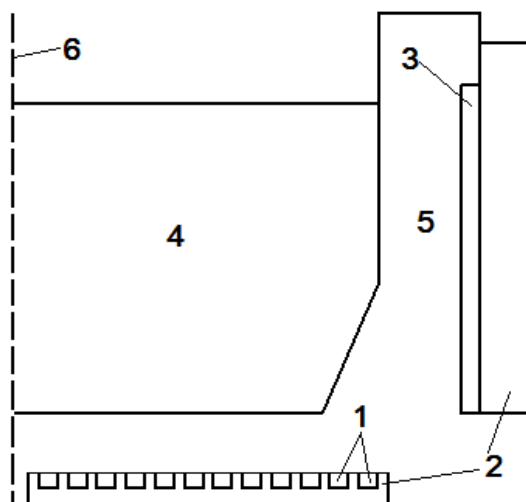


Рис. 1 Схематическое изображение индукционной тигельной печи: 1 – катушки донного перемешивателя; 2 – магнитопровод; 3 – боковой индуктор; 4 – расплавленный металл; 5 – футеровка печи; 6 – ось тигля

В результате первичного компьютерного моделирования было получено, что скорость движения металла под воздействием донного индуктора-перемешивателя на частоте питания 50 Гц составила всего $V_{\max} = 0,255$ м/с. Мощность тепловыделения в расплаве при такой же плотности тока, как в обмотках греющего индуктора, и использовании только донного индуктора снизится в 13 раз. Были предложены два пути увеличения интенсивности перемешивания при снижении мощности тепловыделения в расплаве.

1. Уменьшение частоты питания донного индуктора для подбора ее оптимального значения, при котором будет достигнута максимальная скорость движения металла.
2. Уменьшение немагнитного зазора между расплавом и магнитопроводом донного перемешивателя.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

В таблице 1 приведены значения максимальной скорости перемешивания в объеме расплавленного металла при частотах питания донного индуктора-перемешивателя от 50 Гц до 0,5 Гц для печи с соотношением высоты и диаметра тигля 0,54.

Таблица 1

Значения максимальной скорости перемешивания в объеме расплавленного металла

| ф, Гц | 50 | 25 | 15 | 10 | 5 | 0,5 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| V_{\max} , м/с | 0,255 | 0,278 | 0,272 | 0,254 | 0,195 | 0,047 |

По результатам, приведенным в таблице 1, видно, что наибольшая скорость движения расплавленного металла в тигле печи рассматриваемой конструкции достигается при частоте питания донного индуктора, равной 25 Гц. В дальнейшем все расчеты проводились для этого значения рабочей частоты донного индуктора.

Так как футеровка печи не позволяет приблизить к металлу катушки индуктора, можно предложить удлинить только зубцы магнитопровода. В огнеупорном массиве предлагается разместить магнитные вставки из композиционного материала, состоящего из жаростойкого компаунда и магнитомягкого порошка. В качестве которого предлагается использовать карбонильное железо, обладающее высокой индукцией насыщения (~ 2 Тл), рабочей температурой до 500°C и относительной магнитной проницаемостью $\mu=20000$. Композитный материал сохранит практически все магнитные свойства (точка Кюри, индукция насыщения и т.п.), кроме магнитной проницаемости, которая может значительно уменьшиться. Поэтому необходимо определить минимальное значение магнитной проницаемости, при котором будет наблюдаться эффект от добавления магнитной футеровки.

Зависимость максимальной скорости перемешивания металла при частоте питания донного индуктора 25 Гц от значения относительной магнитной проницаемости надставленных зубцов (магнитных участков футеровки) приведена в таблице 2.

Таблица 2

Зависимость максимальной скорости перемешивания металла от значения относительной магнитной проницаемости надставленных зубцов

| μ | 500 | 250 | 100 | 50 | 25 | 10 | 5 | 1 |
|-------|-----|-----|-----|----|----|----|---|---|
|-------|-----|-----|-----|----|----|----|---|---|

| | | | | | | | | |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $V_{\max},$ м/с | 0,515 | 0,512 | 0,495 | 0,485 | 0,440 | 0,419 | 0,369 | 0,266 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

Минимальным значением относительной магнитной проницаемости, при котором максимальная скорость перемешивания расплавленного металла превышает полученное ранее значение, составляет $\mu = 5$. При значениях магнитной проницаемости вставки $\mu = 25$ и выше увеличение значения этого параметра не оказывает существенного влияния на интенсивность движения металла в тигле.

На рисунке 3,б изображены графики распределения скоростей движения металла в средней части тигля для донного индуктора перемешивателя при питающей частоте 25 Гц, для совместной работы донного индуктора перемешивателя и бокового греющего индуктора при отношении высоты тигля к радиусу 0,54, а также для совместной работы при использовании магнитной футеровки. Численные значения скорости на рис. 3,б взяты вдоль контура, обозначенного на рис. 3,а.

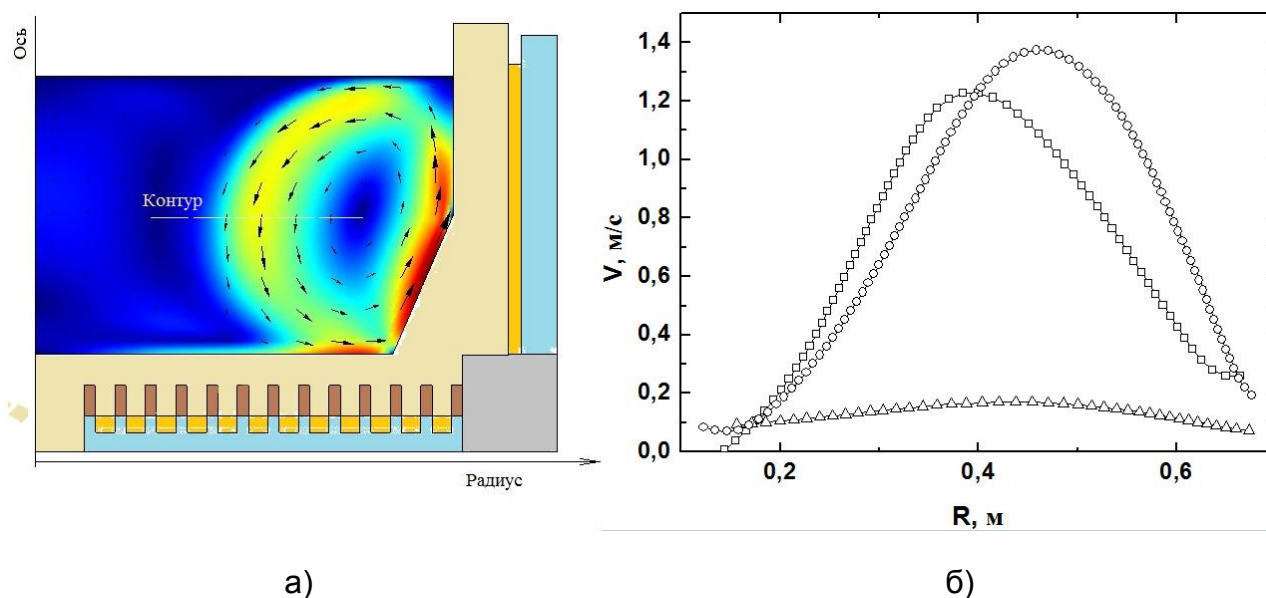


Рис. 3 Результаты расчета поля скоростей в ванне печи: а) поперечный разрез половины агрегата с расчетной картиной распределения скорости движения б) график распределения модуля скорости по радиусу тигля в средней его части: для донного индуктора перемешивателя (Δ), сочетания донного и бокового индукторов без магнитной футеровки (\square) и с учетом магнитной футеровки (\circ)

Графики позволяют увидеть, что совместное использование донного и бокового индукторов вместе с магнитной футеровкой увеличило интенсивность движения расплавленного металла, что повышает скорость процесса науглероживания.

Для оценки энергетических параметров печи при производстве синтетического чугуна требуется провести расчет и сравнение энергетических потерь за время проведения технологической операции науглероживания в печах традиционной и модернизированной конструкций. Расчет производился по методике, изложенной в [3].

Сравнение энергетических параметров печи традиционной конструкции и модернизированной печи с дополнительным донным индуктором-перемешивателем приведено в таблице 3.

Таблица 3

Энергетические параметры печи

| Параметр | | Традиционная конструкция | Модернизованная конструкция |
|---|-----------------|--------------------------|-----------------------------|
| Потребляемая мощность установки, кВт | | 2654,0 | 35,00 ¹ |
| Время операции науглероживания, ч | | 2,5 | 0,31 ² |
| Количество потребленной энергии, кВт·ч | Науглероживание | 6635,0 | 47,00 |
| | Плавнение | 3954,0 | 5625,00 |
| Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т | Науглероживание | 552,0 | 4,00 |
| | Плавнение | 330,0 | 474,00 |
| | Сумма | 882,0 | 478,00 |

Приложения: 1) Здесь приведена мощность только донного индуктора. Для компенсации тепловых потерь печи на этапе науглероживания необходимо будет также использовать боковой индуктор на частоте 250 Гц. Это учитывается при подсчете количества потребленной энергии и удельного расхода электроэнергии агрегата; 2) В печи традиционной конструкции затраченное на процесс науглероживания чугуна время составляет 2,5 часа. В модернизированной печи, исходя из того, что полученное максимальное значение скорости движения металла в восемь раз выше скорости движения металла в печи традиционной конструкции, необходимое время технологического процесса можнократно уменьшить и принять равным 0,31 часа.

4. ВЫВОДЫ

Представленные результаты исследований позволяют заключить, что использование предлагаемых решений по модернизации агрегата для получения синтетического чугуна – как по отдельности, так и совместно – позволяет увеличить интенсивность перемешивания металла в семь раз. Это положительно сказывается на скорости и качестве протекания процесса науглероживания. При этом суммарный расход энергии во время науглероживания можно снизить в два раза при восьмикратном уменьшении времени протекания процесса.

Список использованных источников

1. Лузгин В. И., Петров А. Ю., Фаткуллин С. М., Фризен В. Э. Индукционные плавно-литейные комплексы для производства высококачественного чугуна // Литейщик России. 2013. № 5. С.
2. Frizen V. E., Sarapulov F. N. Formation of MHD processes in induction crucible furnace at single-phase supply of inductor // Russian Electrical Engineering. — March 2010. Vol. 81. № 3. P. 159–164.
3. Фомин Н. И., Затуловский Л. М. Электрические печи и установки индукционного нагрева // «Металлургия». М. 1979. С.